

УДК 535.375.54

© 2000 г. Н.Н. МЕЛЬНИК, Т.М. БУРБАЕВ, Т.Н. ЗАВАРИЦКАЯ,
В.А. КУРБАТОВ, К.В. МАЛАХОВ, М.М. РЗАЕВ, А.Г. ТУРЬЯНСКИЙ,
В.А. КАРАВАНСКИЙ, И.В. ПИРШИН

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОЧАСТИЦ

Методом комбинационного рассеяния света и фотолюминесценции исследованы оптические свойства наночастиц на основе Si/Ge. Наночастицы создавались анодным травлением планарных структур, выращенных методом пучковой эпитаксии. Показано, что в видимой области появляются дополнительные полосы люминесценции. В области 0,7–1,1 эВ происходит увеличение интенсивности люминесценции и сужение ряда полос.

Введение

Полупроводниковые наночастицы являются объектами, перспективными как для практического применения, так и для научного исследования физических процессов, происходящих в твердом теле. Это обусловлено дополнительными свойствами наночастиц по сравнению с исходными массивными монокристаллами. Так, многие полупроводниковые наночастицы обладают интенсивной люминесценцией в видимой области. Наноструктуры, созданные методом электрохимического травления, обладают кристаллической решеткой более совершенной, чем исходный монокристалл [1]. Обнаружено взаимодействие фононных мод в ансамблях наночастиц, полученных анодным травлением монокристаллических сверхрешеток Si/Si_xGe_{1-x} [2].

Целью настоящей работы являлось исследование оптических свойств полупроводниковых наночастиц на основе Si/Si_xGe_{1-x} и отработка методики создания контролируемым образом ансамблей взаимодействующих наночастиц различной конфигурации.

Методика

Исходные сверхрешетки Si/Ge и Si/Ge_xSi_{1-x} изготавливались методом пучковой эпитаксии на установке типа "КАТУНЬ". Пористые слои формировались методом анодного травления. В качестве электролита использовался раствор HF (49%) : C₂H₅OH в соотношении 1 : 1. Анодирование выполнялось в двухкамерной электрохимической ячейке, выполненной из фторопласта с площадью рабочей поверхности 1 см². В качестве катода использовалась платина. Анодирование образцов осуществлялось при фиксированной плотности тока j в следующих режимах: для образцов М-8 и М-10 $j = 10$ мА · см², длительность травления 600 с, для образца М-14 $j = 10$ мА · см² длительность травления 40 с. Характеристики полученных образцов приведены в таблице.

Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) и фотолюминесценции при комнатной температуре регистрировались на спектрометре U-1000, оснащенный микроскопом, в режиме исследования микрообразцов. Низкотемпературные спектры фотолюминесценции измерялись при температуре 2 К с помощью монохроматора МДР-2. Источником возбуждения служил полупроводниковый лазер ($\lambda = 0,66$ мкм, $I = 4$ Вт · см²). Излучение регистрировалось охлаждаемым германиевым ррп-фотодиодом.

Рентгеновские исследования проводились с помощью двухволнового рентгеновского рефлектометра с рабочими длинами волн 0,154 и 0,139 нм. Параметры сверхструк-

Образец	Подложка	N	$d_{Si}, \text{Å}$	$d_{SiGe}, \text{Å}$	x	$d = d_{Si} + d_{SiGe}$	d (КРС)	d (X)
М-8	Si(001)	25	182	7	1	189	172	192
М-10	Si(001)	7	80	40	0,25	120	180	165
М-14	Si(001)	10	100	100	0,68	200	—	—

Примечание. Здесь — N число слоев; d_i — толщина соответствующего слоя; d (КРС) и d (X) — период сверхрешетки соответственно по КРС- и рентгеновскому измерениям.

туры выбирались с помощью программной обработки по критерию наилучшего совпадения экстремумов экспериментальной и расчетной кривых.

Структура сверхрешеток также контролировалась по низкочастотным спектрам КРС [3].

Результаты эксперимента

Спектры КРС исходных сверхрешеток представляют собой "классические" спектры сверхрешеток на основе Si/Ge, Si_{1-x}, в которых существует высокочастотная область, отвечающая за колебания Si-Si, Si-Ge и Ge-Ge, а также низкочастотная область, отвечающая за "сложение" акустических мод в сверхрешетках.

Проведенные исследования показали, что исходные сверхрешетки являются довольно качественными. На рис. 1 приведены спектры КРС низкочастотной области и рентгеновская рефлектограмма сверхрешетки образца М-8. В таблице приведены технологические и расчетные данные по периоду решетки. Некоторое рассогласование между технологически заложенными параметрами сверхрешетки и данными, полученными из рентгеновских измерений и низкочастотных спектров КРС, по нашему мнению, подтверждает вывод работы [4], что для периодических сверхрешеток, слои которых имеют близкие толщины, формула Рытова [5] не точно описывает положение частот "свернутой" акустической моды.

Спектры КРС пористых сверхрешеток в целом повторяют спектры КРС исходных, но при этом происходит "улучшение" спектра: линии сужаются, становятся более интенсивными и симметричными.

Более радикально перестраиваются спектры люминесценции. Так, в видимой области появляются новые полосы (рис. 2). Их вид и положение зависят от параметров сверхрешетки. На рис. 3 приведены спектры фотолюминесценции образца М-14 в ближней ИК-области (0,8 и 1,1 эВ) при температуре $T = 2$ К. Как и для спектров КРС, в спектрах фотолюминесценции также наблюдается увеличение интенсивности и сужение полос на травленных участках.

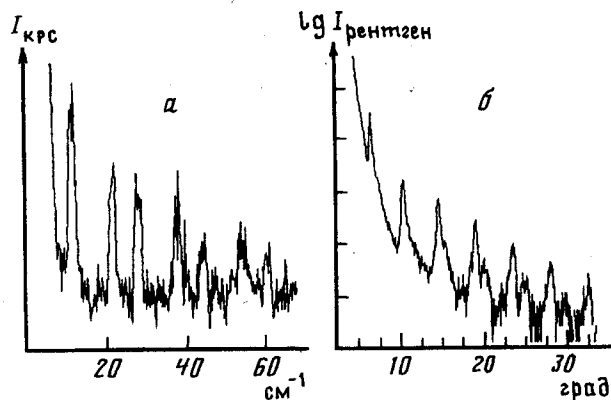


Рис. 1. Низкочастотные спектры КРС (а) и рентгеновская рефлектограмма (б) сверхрешетки образца М-8

Рис. 2. Спектры фотолюминесценции в видимой области исходных (кривые 1) и пористых (кривые 2) сверхрешеток образцов *a* – М-14; *б* – М-8

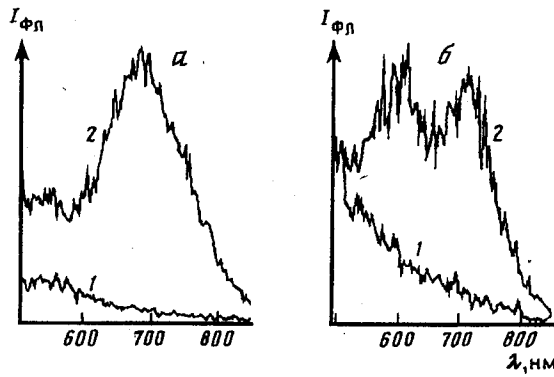
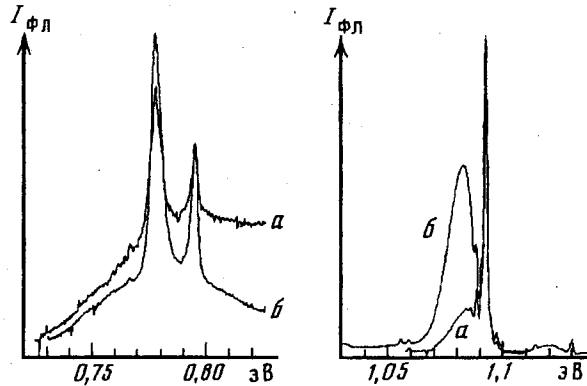


Рис. 3. Низкотемпературные спектры люминесценции исходной (*a*) и травленной (*б*) сверхрешетки образца М-14



Обсуждение и выводы

Полученные результаты показывают, что при анодном травлении сверхрешеток можно формировать наночастицы с различными электронными свойствами. Сам процесс травления преимущественно проходит по участкам с нарушениями кристаллической структуры, но не приводит к ухудшению монокристаллических участков сверхрешеток. Более того, при возникновении новых электронных состояний не происходит ухудшения исходных электронных состояний. Представляет интерес отработать методику контролируемого изменения размеров монокристаллических участков сверхрешетки для получения новых квантовых состояний.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и технологии РФ по программе "Физика твердотельных наноструктур" (№ 97-1050, 97-1073), Государственной программы поддержки ведущих научных школ (№ 96-15-96341) и РФФИ (грант № 97-02-17637).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заварицкая Т.Н., Караванский В.А., Квит А.В., Мельник Н.Н. // ФТП. 1998. Т. 32. № 2. С. 235.
2. Заварицкая Т.Н., Караванский В.А., Мельник Н.Н., Рзаев М.М. // Изв. РАН. Сер. физ. 1999. Т. 62. № 2.
3. Brugger H. et al. // Phys. Rev. B. 1986. V. 33. № 8. P. 5928.
4. Мельник Н.Н., Пудонин Ф.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 1999. Т. 62. № 2. С. 299.
5. Rytov S.M. // Akust. Zh. 1956. V. 2. P. 71.

Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук, Москва